输电导线舞动特性分析及监测系统Ⅱ

祝贺,邢宏超,袁鸣

(东北电力大学建筑与工程学院,132012 吉林)

摘　要:为解决传统的导线舞动监测方法安装复杂、施工难度高、监测受限、数据精度往往过低等问题,提出了基于九轴惯性组合传感监测技术,建立了输电线路舞动力学模型,对舞动线路进行受力分析。通过对导线舞动监测系统进行设计,建立了一套完整的导线舞动监测装置。现场应用和数据结果验证了该系统的可行性,与传统系统相比,九轴惯性组合传感监测系统能有效提高数据精度,提高可靠度,减小施工难度,可监测多种数据,该系统具有很好的推广前景,对提高输电线路舞动监测的实时性具有重要意义。

关键词:输电线路;舞动;在线监测;九轴惯性组合

中图分类号:TM75　　　　**文献标志码:**A

Detection of transmission line galloping by nine-axis inertial combination sensor

ZHU He, XING Hongchao, YUAN Ming

(School of Architecture and Engineering, Northeast Electric Power University, 132012 Jilin, China)

Abstract: In order to solve the problems of complex installation, great construction difficulty, limited monitoring and low data accuracy of traditional wire galloping monitoring methods, a nine-axis inertial integrated sensor monitoring technology is proposed. The dynamic model of transmission line galloping is established, and the force of galloping line is analyzed. Through the design of the galloping monitoring system of conductor, a complete galloping monitoring device of conductor is established. Field application and data results verify the feasibility of the system. Compared with the traditional system, the nine-axis inertial integrated sensor monitoring system can effectively improve data accuracy, improve reliability, reduce construction difficulty, and monitor a variety of data. The system has good prospects for promotion and great significance in improving the real-time monitoring of transmission line galloping.

Key words: transmission line; galloping; on-line monitoring; nine-axis inertial combination

目前输电线路舞动监测主要结合真型试验线路和风洞实验,投资大,建设周期长,运行成本高。实际线路由于受各类因素影响,且地形和工况不同,难以直接将实验数据应用于实际线路中。文献[1]研究了无覆冰导线下舞动的机理。文献[2]的研究表明,输电线路的冰跳高度随着覆冰厚度的增加而明

收稿日期:2020-09-10　　　**修回日期:**2021-12-20

基金项目:吉林省科技厅项目(No. 20180201025SF)

通信作者:祝贺,教授。E-mail:zhuhe1215@163.com

引用格式:祝贺,邢宏超,袁鸣. 输电导线舞动特性分析及监测系统Ⅱ[J]. 应用力学学报,2022,39(2):283-290.

ZHU He, XING Hongchao, YUAN Ming. Detection of transmission line galloping by nine-axis inertial combination sensor[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(2):283-290.

显增加;对于不均匀脱冰,随着脱冰位置向跨中靠近,冰跳高度明显增加,并且对连续档线路影响更大。文献[3]的研究表明,当子导线间距较小时,迎风侧子导线尾流对两子导线的气动参数均产生影响,且对背风侧子导线影响较大,研究分裂导线舞动时不可忽略。文献[4]提出了低阻尼系统共振的舞动机理,该理论认为在风作用下整个架空输电线路各组成单元都产生不同的振动。文献[5]的研究表明,受上游迎风子导线尾流的影响,下游背风子导线的阻力系数明显降低,下游背风子导线的升力系数出现峰值(极大值),而上游迎风导线的尾流对下游背风子导线的扭矩影响较小。导线舞动具有复杂性、不稳定性,目前对舞动规律还没有完全掌握,需要长期的努力。我国的防舞工作,不管是理论还是试验上,都和发达国家有着很大的差距,对导线舞动稳定性机理还需要在不断的实践中获得完善。尤其近年来,我国输电线路的舞动频率增高,在东北、华北与华中甚至形成了舞动的多发地区。而舞动已经严重影响了这些电力密集地区的输电安全。在人烟稀少的地区输电线路将产生较为严重的舞动,此线路的实时舞动数据无法通过人工获取[6-8]。文献[9]通过非线性有限元方法,详细研究了档数和档距对仅有中间档覆冰导线满足舞动条件时,整个耐张段内输电线振动幅值的影响,分析了中间档覆冰导线满足舞动条件的区域,对整个耐张段内导线振动幅值的影响。针对工程实践中加速度信号转换为位移量不精确的问题,采用最小二乘法、数字滤波等算法对信号进行预处理,并通过对时域和频域两种情况下的积分对比,得出频域积分效果较好[10-14]。

围绕输电线路舞动在线监测系统,通过对系统的结构介绍,基于九轴惯性组合传感器测量技术提出导线舞动监测系统的设计方案;并在某线路进行现场安装应用、实测,证明系统的有效性和可靠性,为输电导线舞动在线监测技术的发展奠定基础。

1 输电线路舞动力学模型及受力分析

1.1 导线舞动力学模型分析

输电线路产生舞动时,导线受偏心覆冰的影响,在竖直向、水平向和扭转向显著的结构和气动力耦合效应下,将会产生气动升力、气动阻力和扭转力矩。具体受力分析如图 1 所示。

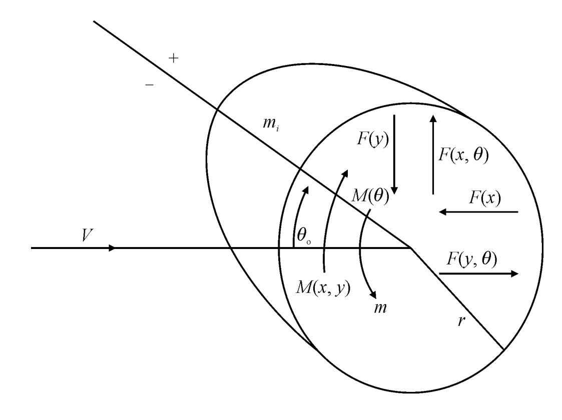


图 1　导线舞动受力分析图

Fig. 1　Analysis diagram of galloping force of conductor

图 1 中,$F(x)$、$F(y)$、$M(\theta)$分别为惯性力、阻尼力、刚性力在水平、垂直和扭转 3 个自由度上的合力。

导线舞动过程中的静态及动态位置分别如图 2 所示。图中:x、y 分别为导线横截面平面内的水平及竖直方向的位移;u 为水平静风速;γ 为初始凝冰角(静态攻角);θ 为扭转角;O_1 为无覆冰导线中心位置;O_2 为覆冰导线的重心;e 为覆冰导线的重心离导线中心的偏心距。

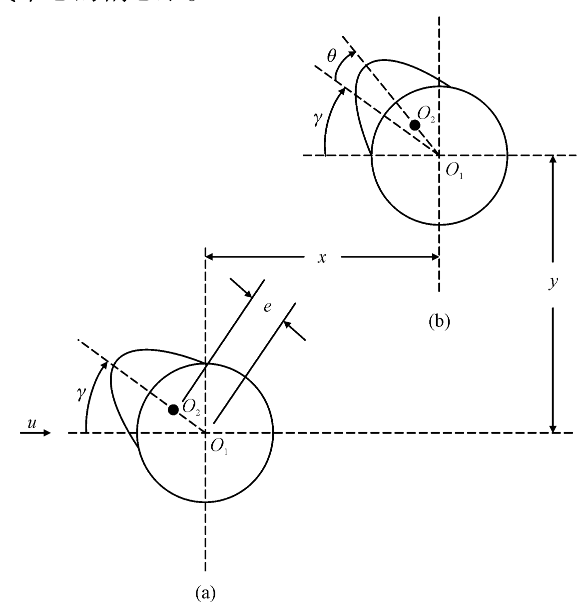


图 2　覆冰导线的静态和动态位置示意图

Fig. 2　Static and dynamic position diagrams of iced conductors

考虑到水平、垂直及扭转方向运动,覆冰导线受空气动力作用时,舞动三自由度力学模型及合成风速矢量如图 3 所示。图中:U_r 为相对风速;$L(\alpha)$ 和 $D(\alpha)$ 分别为导线单位长度受到的气动升力和阻力;$M(\alpha)$ 为导线单位长度受到的空气动力矩;α 为攻角;β 为动态攻角。

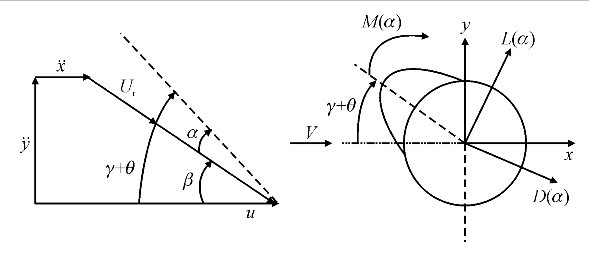


图 3　覆冰导线合成风速矢量图和受空气动力图

Fig. 3　Synthetic wind vector map and aerodynamic map of iced conductor

1.2　建立横扭耦合动力方程

1.2.1　横扭耦合动力方程建立理想性假定

在对覆冰导线舞动的力学模型进行描述时，不仅需要考虑横扭耦合动力方程计算求解过程中的简单方便，而且需要尽可能反映出实际导线舞动的特点。基于以上原则及实际导线舞动的特征，对考虑垂直、水平和扭转 3 个方向耦合振动的力学模型，做以下理想性假定。

1）导线两端当作固定端处理，忽略相邻档距带来的影响。

2）导线按照“悬链线”理论视为张紧弦。

3）导线受到的张力随着档距不发生变化，把舞动视为驻波。

4）导线受到的冰风效应影响顺着档距不发生变化。

5）导线受到的风荷载及气体黏滞阻尼力的作用中心、导线中心及覆冰导线截面的几何中心重合。

6）垂直、水平和扭转模型中的机械阻尼是黏性的，并且在垂直、水平和扭转模型中阻尼力完全不耦合。

7）方程建立过程中，忽略防舞装置等对导线的影响。

1.2.2　覆冰导线受力参数分析

作用在导线上的力可以分解为各种类别的力，包括惯性力、刚性力、阻尼力及空气动力。图 3 中各个力学参数可表示为以下形式。

1）空气动力

动态攻角 β、攻角 α、相对风速 U_r、气动升力 $L(\alpha)$、气动阻力 $D(\alpha)$ 及气动力矩 $M(\alpha)$ 分别见式（1）~式（6）。

动态攻角 β 为

$$\beta = \arctan\frac{\dot{y}}{u-\dot{x}} \approx \frac{\dot{y}}{u} \tag{1}$$

攻角 α 为

$$\alpha = \gamma - \beta + \theta \tag{2}$$

相对风速 U_r 为

$$U_r = \sqrt{(u-\dot{x})^2 + \dot{y}^2} \tag{3}$$

气动升力 $L(\alpha)$ 为

$$L(\alpha) = \frac{1}{2}\rho d U_r^{\ 2}\left[C_L(\gamma) + C_{L\alpha}\left(\theta - \frac{\dot{y}}{u}\right)\right] \tag{4}$$

气动阻力 $D(\alpha)$ 为

$$D(\alpha) = \frac{1}{2}\rho d U_r^{\ 2}\left[C_D(\gamma) + C_{D\alpha}\left(\theta - \frac{\dot{y}}{u}\right)\right] \tag{5}$$

气动力矩为 $M(\alpha)$ 为

$$M(\alpha) = \frac{1}{2}\rho d^2 U_r^{\ 2}\left[C_M(\gamma) + C_{M\alpha}\left(\theta - \frac{\dot{y}}{u}\right)\right] \tag{6}$$

式中：u 为水平静风速；γ 为初始凝冰角；ρ 为空气密度，kg/m^3；C_L、C_D、C_M 分别为升力系数、阻力系数及力矩系数；$C_{L\alpha}$、$C_{D\alpha}$、$C_{M\alpha}$ 分别为 C_L、C_D、C_M 对 α 的一阶导数；d 为覆冰导线截面长度，m。

从图 3 可以看出，气动力诸力在垂直和水平方向分量为

$$\begin{cases} F_x = L(\alpha)\sin\beta + D(\alpha)\cos\beta \\ F_y = L(\alpha 0\cos\beta - D(\alpha)\sin\beta \end{cases} \tag{7}$$

2）阻尼力

导线水平方向、垂直方向及扭转方向受到的阻尼力分别见式（8）~式（10）。

导线水平方向受到的阻尼力为

$$F_x = 2(m+m_i)\zeta_x\omega_x\dot{x} \tag{8}$$

导线垂直方向受到的阻尼力为

$$F_y = 2(m+m_i)\zeta_y\omega_y\dot{y} \tag{9}$$

导线扭转方向受到的阻尼力为

$$F_\theta = 2I\zeta_\theta\omega_\theta\dot{\theta} \tag{10}$$

式中：m 为导线单位长度质量，kg/m；m_i 为导线单位长度上覆冰质量，kg/m；ζ_x、ζ_y、ζ_θ 分别为导线水平、垂直及扭转方向机械阻尼系数；ω_x、ω_y、ω_θ 分别为导线水平、垂直及扭转方向振动频率，1/s；I 为覆冰导线单位长度质量极惯性矩，kg · m。

3）刚性力

导线水平方向、垂直方向受到的刚性力，以及扭转方向受到的力矩分别见式（11）~式（13）。

导线水平方向受到的刚性力为

$$F_x = T\left(\frac{k\pi}{L}\right)^2 x \tag{11}$$

导线垂直方向受到的刚性力为

$$F_y = T\left(\frac{k\pi}{L}\right)^2 y \tag{12}$$

导线扭转方向受到的力矩为

$$M = G_J \left(\frac{k\pi}{L}\right)^2 \theta \qquad (13)$$

式中：T 为导线张力，N；L 为线路档距，m；k 为舞动阶次；G_J 为导线单位长度扭转刚度，N · m^2/rad。需要指出的是，实际输电线路的舞动多数以一阶舞动阶次为主。

4）惯性力

导线水平方向、垂直方向及扭转方向受到的惯性力分别见式（14）～式（16）。

水平方向受到的惯性力为

$$F_x = (m + m_i)\ddot{x} + m_i e\sin\gamma\ddot{\theta} \qquad (14)$$

垂直方向受到的惯性力为

$$F_y = (m + m_i)\ddot{y} + m_i e\cos\gamma\ddot{\theta} \qquad (15)$$

扭转方向受到的惯性力为

$$M_\theta = I\theta + m_i e\sin\gamma\ddot{x} + m_i e\cos\gamma\ddot{y} \qquad (16)$$

2 导线舞动监测系统设计

采用九轴惯性传感器监测导线舞动位移，根据绝缘子具体型号和连接方式定制的拉力及倾角传感器，监测绝缘子串倾角及拉力；采用高清集成360°摄像机进行视频监控；采用微气象传感器监测铁塔周围环境微气象，包括温度、湿度、气压、风速、风向等。导线舞动传感器与现场数据采集单元之间采用无线通信，其余传感器均采用有线方式与现场数据采集单元相连。现场数据采集单元通过4G无线网络与远程监控中心服务器通信。监测系统的典型架构如图4所示。

2.1 导线舞动系统总体设计

设计一套输电导线舞动状态的综合数据采集、分析及健康评价系统。该系统包含现场数据采集单元、监控主机以及远程监控中心数据分析及健康评价平台。

数据采集单元负责现场各类输电导线监测数据（导线动态位移）的采集。监控主机负责现场各类数据采集单元数据的采集、无线传输及实时分析处理。远程监控中心数据分析及健康评价平台负责接收监控主机发送来的数据，并基于上述数据，调用特定的数据分析及导线健康评价算法，自动对输电导线健康状态进行评价，并通过系统软件界面输出健康评价结果。

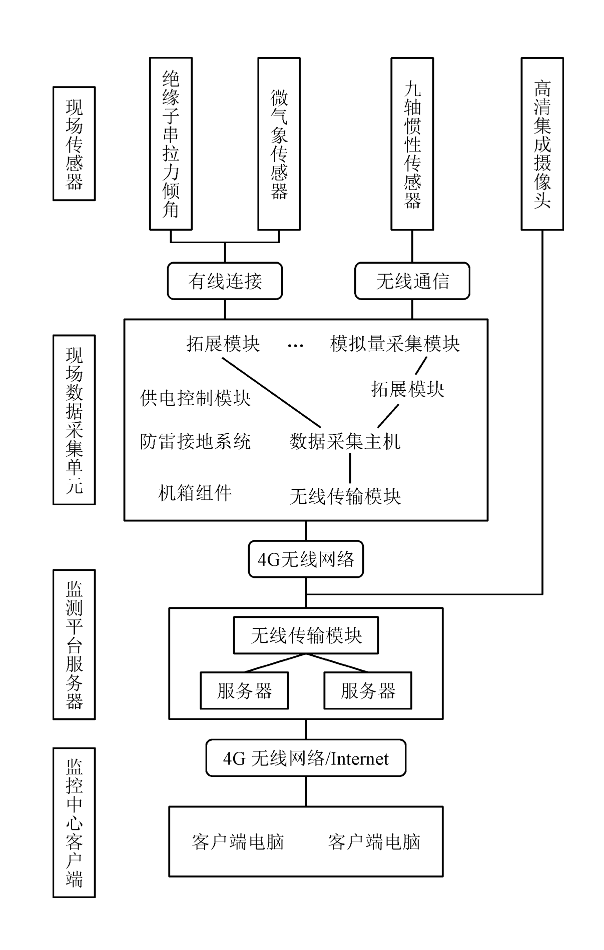


图4　系统总体框图

Fig. 4　System block diagram

2.2　系统工作原理

输电导线舞动监测系统采用九轴惯性组合传感器测量技术，系统的安装示意图如图5所示。输电导线舞动监测系统主要由九轴惯性监测单元（加速度、陀螺仪、电子罗盘传感器）、杆塔监测主分机、数据监控中心、通讯单元（有线通信、4G通信）等部分构成。杆塔监测主分机安装在杆塔上，主要负责采集微气象数据信息（风速、风向等）和收发舞动监测单元数据；九轴惯性传感器安装在导线上，在一个档距内一条导线上选5个特征点安装，节点数据通过无线传输网络传输至杆塔监测主分机，主分机在对监测数据进行预处理后，经过4G无线传输模块传输到监控中心。利用空间姿态变换、加速度位移转换等算法对数据进行处理，准确得到各监测点随时间变化的坐标值；同时采用插值法、最小二乘法等拟合出导线舞动二维或三维轨迹，进而实现输电导线舞动轨迹的精确还原。

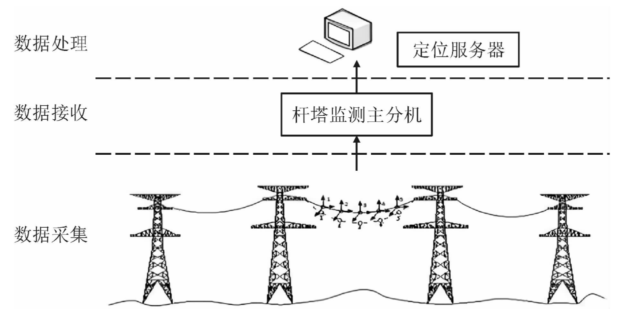


图 5 输电导线舞动检测系统安装示意图

Fig. 5 Installation schematic diagram of galloping detection system for transmission line

2.3 系统满足的具体技术要求

2.3.1 监控主机

监控主机是针对电力线路监控专门研发的一套数据采集处理系统，通过 4G/3G/GPRS/CDMA 无线网络实现舞动数据、图像视频、微气象数据的采集和处理，通过远程数据的采集和处理为输电线路的安全运行提供保证。

监控主机能通过网络将测量结果传输到状态监测主站系统。同时，需满足以下技术要求。

1）具备受控采集功能，能响应远程指令，按设置采集方式、自动采集时间、采集时间间隔启动采集。

2）具备电池电压等采集功能。

3）具备良好的同步机制，保证各参数采集时刻的同步性。

4）具备数据合理性检查分析功能，对采集数据进行预处理，自动识别并剔除干扰数据。

5）能循环存储至少 30 d 的综合等状态量数据。

6）具备对装置自身工作状态包括采集、存储、处理、通信等的管理与自检测功能；当判断装置出现运行故障时，能启动相应措施恢复装置的正常运行状态。

2.3.2 舞动采集单元

舞动采集单元是本系统的核心，其内部由高精密九轴惯性传感器组成；传输方式采用 zigbee 无线通信；供电方式用高压取电以及大容量锂电池，保证采集单元能实时运行。

2.3.3 图像采集单元

采用高清一体机芯，高亮红外灯设计，实现真正的无暗角。本单元使用多种安装结构方式，安装方便，故障率小。具有防高磁辐射隔离电路、防低寒自动加热模块，内置高灵敏温度传感器，球机可根据自身温度自动控制内部加热器的开启与关闭。同时，需集成业内全功能高速球机的功能，如英文菜单、菜单锁定、等功能，更为智能化。图像采集单元应满足如下技术要求。

1）应具备现场照片的拍摄功能，且能够采用无线通信方式进行图像数据实时和定时传输。

2）应能够实时接收并响应主站系统发出的摄像头开启、拍照、数据上传、拍摄角度转换、分辨率调整、预置位调整等控制命令。

3）应具备远程调焦、设置图片采集时间间隔等功能。

2.4 舞动探头安装原则及方法

导线舞动监测的目标位：监测导线特征点的舞动位移，并基于导线舞动位移，进行导线舞动曲线重构。基于上述目的，舞动探头数量建议为 4 ~ 5 个；由于导线舞动沿导线方向呈现正弦波形式，而且舞动半波数通常为 1 和 2，因此舞动探头沿导线方向的布置原则是当舞动半波数为 2 时，也能完成较好的舞动曲线重构。舞动探头布置位置不要求完全均布或对称，考虑到当舞动半波为 2 时，导线左右半档的振动位移成对称分布，因此可沿半档导线布置 4 个探头，另一侧布置 1 个探头。由于探头质量较小，档内舞动探头一般不多于 5 个，相对于导线舞动趋势变化，安装的探头影响可忽略不计，另外，这部分影响也在算法中予以优化。

3 现场应用及数据分析

输电线路舞动监测传感器系统主要由导线舞动探头、微气象传感器、视频监控、绝缘子串的拉力和倾角传感器组成。整体布置如图 6 所示。



图 6 输电线路舞动监测系统传感器布置图

Fig. 6 Sensor layout of transmission line galloping monitoring system

输电线路舞动在线监测系统在贵州某输电线路

上进行现场安装应用，在输电线路上安装舞动监测装置。所安装主要设备的照片如图 7 ~ 图 9 所示。

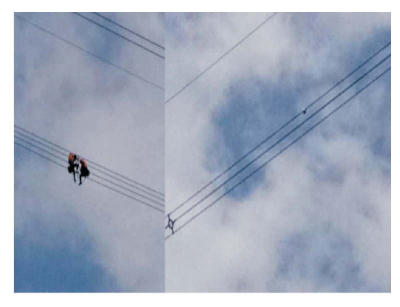


图 7 导线舞动探头及现场安装

Fig. 7 Wire galloping probe and field installation

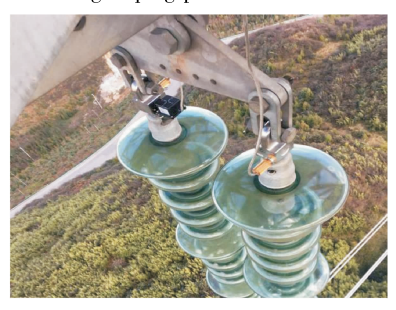


图 8 绝缘子串倾角及拉力测试单元的实际安装图

Fig. 8 Installation diagram of insulator string inclination and tension test unit



图 9 舞动监测传感器安装

Fig. 9 Installation of galloping monitoring sensor

其中导线舞动探头安装于导线上。首先需根据导线具体尺寸定制和封装导线舞动探头，安装时只需将舞动探头卡在导线上并拧紧螺栓即可。封装导线舞动探头具备防水能力，不需要保护装置。

舞动探头安装在防冰基地 N2 塔和 N3 塔之间的 500 kV 导线上，安装位置分别为导线跨度的 1/8、2/8、3/8、4/8、6/8 处，共 5 个测点。该导线跨度为 388 m，是最大跨，该跨最有可能发生舞动。

1）微气象监测

主要监测内容为温度、风速、风向和气压。监测系统会记录并绘制任意时间段内的曲线图，展示气象条件的变化情况。图 10 ~ 图 12 分别为导线运行环境时的温度、风速、风向变化趋势图。

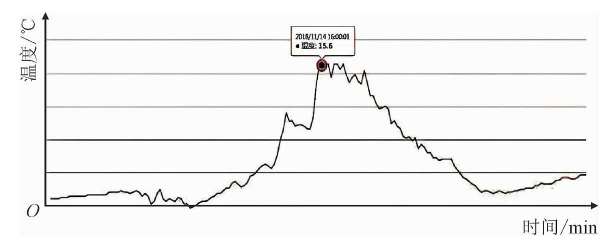


图 10 温度变化趋势图

Fig. 10 Temperature trend map

2）舞动监测

导线舞动特征主要为舞动振幅。本监测系统忽略横向位移，主要考虑纵向位移的幅值，以平衡位置为零点，监测上下舞动位移，上舞动为正，下舞动为负，图 13 所示为位移变化趋势图。

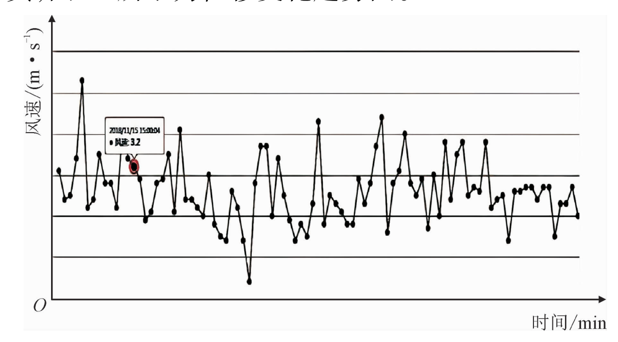


图 11 风速变化趋势图

Fig. 11 Wind speed change trend map

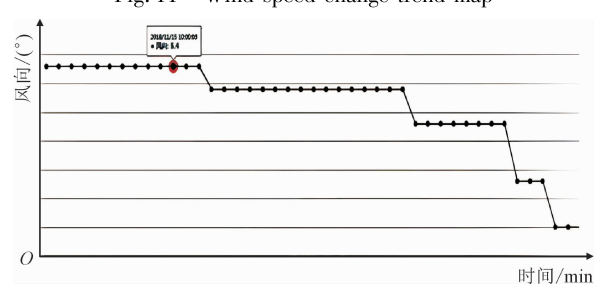


图 12 风向变化趋势图

Fig. 12 Wind direction change trend map

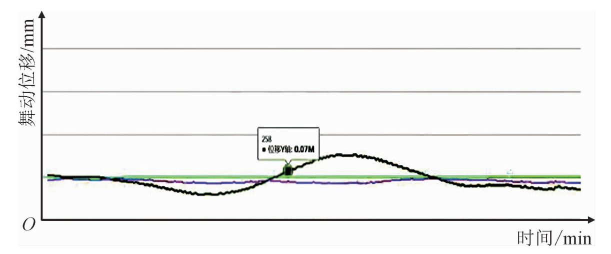


图 13 导线舞动位移变化趋势图

Fig. 13 Trend diagram of galloping displacement of conductor

导线舞动监测系统的绝缘子串拉力和倾角传感器可实时监测并记录顺导线方向的绝缘子串偏斜角和垂直导线方向的风偏角，图 14 ~ 图 15 分别为绝缘子串偏斜角和风偏角的变化趋势图。

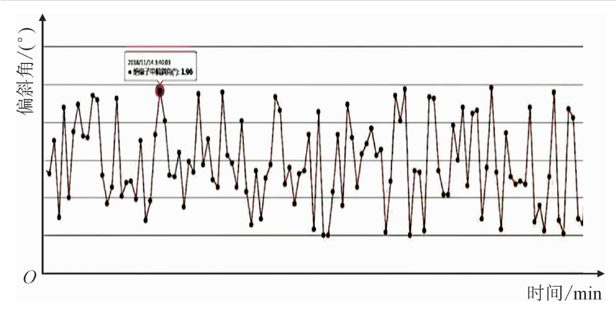


图 14　绝缘子串偏斜角变化趋势图

Fig. 14　Trend chart of deflection angle of insulator string

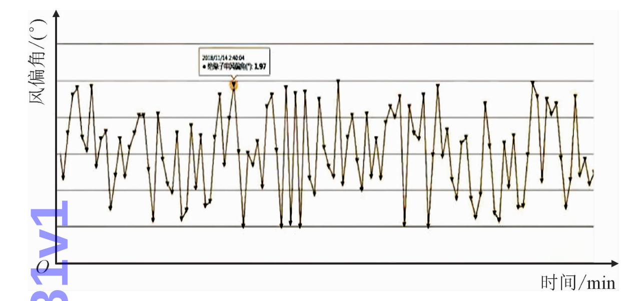


图 15　绝缘子串风偏角变化趋势图

Fig. 15　Installation of galloping monitoring sensor

3) 视频浏览

视频监控设备可实时监控导线及绝缘子现场情况。连接平台后,可在操作界面中控制视角的空间移动,动态观察导线及绝缘子串运行状态。图 16 所示为现场监控照片。

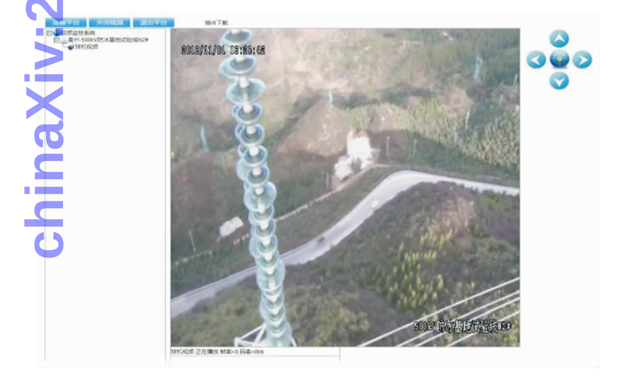


图 16　导线和绝缘子串现场监控图像

Fig. 16　On-site monitoring image of conductor and insulator strings

4　输电导线舞动监测方案对比论证

本研究将对基于超宽带定位技术的输电导线舞动监测方案进行对比。通过与超宽带定位厂家技术人员的深入讨论,得到如下结论:超宽带定位基站的设置方式直接影响导线上标签的测试精度,一般来讲,基站要求被设置在标签的四周,即上下左右都要设置,基站连线需形成凸多变形,而标签需要尽量在凸多边形的中心位置,这样精度才有保证。但是在现场,无法按上述方式设置基站,因为标签在导线上,不可能再把基站设置的比导线还高。另外,即使降低要求,把基站设置在导线下,在现场施工起来也很困难,因为需要安装较高的路灯杆(约 15 m),用于在不同高度上安装基站,这个施工难度也很大,因为导线位于山坡,设备运输也是问题。如果根据现场条件只在某些位置设置较低的基站,测试效果和精度又难以保证。综上所述,单纯基于超宽带定位技术进行输电导线舞动监测,目前受现场施工条件制约,尚不成熟,实用性有待探讨。

考虑到上述问题,研究和论证了采用九轴惯性传感器的输电导线舞动监测技术。通过与相关技术人员的深入探讨,并查阅了大量文献,得到如下结论:目前来讲,基于九轴惯性传感器进行输电导线舞动监测是可行的,在对后续数据处理算法进行改进和优化后,其位移测试相对精度可以保证。舞动采集单元是本系统的核心,其内部由高精密九轴惯性传感器组成。九轴惯性传感器包括三轴陀螺仪、三轴加速传感器和三轴磁感应传感器。测量精度高,稳定性好,测量时对环境的要求较低,安装方便,测量便捷。另外通过采样频率的优化设置和线上数据采集设备功耗的合理控制,再配以大容量的电池,线上设备的带电工作时间能达到一年以上。

5　结　论

导线舞动在线监测系统基于九轴惯性组合传感器测量技术,安装于导线上的监测装置可以将所获得数据,经内置算法软件转化为舞动位移数据,并将导线的舞动位移数据运用无线通信技术传送给监控终端,从而有效地实现了对输电线路舞动状况的在线监测。可得到以下 3 条结论。

1) 该系统较其他系统具有安装简单、施工周期短、经济效益好,不受环境约束等特点。

2) 该系统可测导线周围环境温度、风速、风向变化趋势、导线舞动位移变化趋势及绝缘子串风偏角等。

3) 该系统所测导线舞动位移数据可知风速增大,舞动位移增加,绝缘子串风偏角增大,与现场实测相吻合,精度较高。

本研究研究成果对输电导线舞动监测技术的研究具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 刘亮,郝震,崔赟,等.架空线路无覆冰导线舞动的参数共振机理[J].振动工程学报,2018,31(2):308-313.(LIU Liang,HAO Zhen,CUI Yun,et al. Parametric resonance mechanism of ice-free conductor galloping on overhead lines[J]. Journal of vibration engineering,2018,31(2):308-313(in Chinese)).

[2] 吴天宝,胡中原,王健,等.输电线路脱冰跳跃动态模型研究[J].应用力学学报,2018,35(1):134-140.(WU Tianbao,HU Zhongyuan,WANG Jian,et al. Research on dynamic model of transmission line deicing jump[J]. Chinese journal of applied mechanics,2018,35(1):134-140(in Chinese)).

[3] 伍川,严波,张博,等.变化的气动力和电磁力对覆冰双分裂导线舞动的影响[J].应用力学学报,2019,36(2):364-371.(WU Chuan,YAN Bo,ZHANG Bo,et al. Influence of varying aerodynamic and electromagnetic forces on galloping of iced double bundle conductor[J]. Chinese journal of applied mechanics,2019,36(2):364-371(in Chinese)).

[4] 蔡延湘.输电线舞动新机理研究[J].中国电力,1998,31(10):62-66.(CAI Tingxiang. Study on new mechanism of transmission line galloping[J]. China electric power,1998,31 (10) :62-66(in Chinese)).

[5] 何春晖,孙启刚,宋卓彦,等.覆冰八分裂导线气动特性数值模拟[J].国网技术学院学报,2017,20(5):13-17.(HE Chunhui,SUN Qigang,SONG Zhuoyan,et al. Numerical simulation of aerodynamic characteristics of iced eight-split conductor[J]. Journal of National Network Institute of Technology,2017,20(5):13-17(in Chinese)).

[6] 傅观君,王黎明,关志成,等.架空输电线路分裂导线扭转刚度及舞动机理分析[J].高电压技术,2013,39(5):1273-1280.(FU Guanjun,WANG Liming,GUAN Zhicheng,et al. Torsional stiffness and dancing mechanism analysis of split conductors in overhead transmission lines[J]. High voltage technology,2013,39(5):1273-1280(in Chinese)).

[7] 胡涛.浅析导线舞动稳定性机理及其在输电线路上的应用[J].科技创新与应用,2014(28):176.(HU Tao. Brief analysis on stability mechanism of conductor galloping and its application in transmission line[J]. Innovation and application of science and technology,2014(28):176(in Chinese)).

[8] 钟黎明,高义斌,冀晋川,等.覆冰分裂导线舞动的ANSYS有限元分析法[J].科技资讯,2014(32):63-66.(ZHONG Liming,GAO Yibin,JI Jinchuan,et al. ANSYS finite element analysis of ice-covered split wire dancing[J]. Science and technology information,2014 (32):63-66(in Chinese)).

[9] 刘小会,陈世民,韩勇,等.考虑邻档影响的覆冰输电线舞动数值模拟及参数分析[J].应用力学学报,2014,31(4):540-550.(LIU Xiaohui,CHEN Shimin,HAN Yong,et al. Numerical simulation and parameter analysis of galloping of ice covered transmission line considering the influence of adjacent span[J]. Chinese journal of applied mechanics,2014,31(4):540-550(in Chinese)).

[10] 邵颖彪,卢明,魏建林,等.特高压输电线路新型防舞装置及其有效性分析[J].电瓷避雷器,2018(1):177-182.(SHAO Yingbiao,LU Ming,WEI Jianlin,et al. New anti-dancing devices for UHV transmission lines and their effectiveness analysis[J]. Electric ceramic arrester,2018 (1):177-182(in Chinese)).

[11] 向玲,任永辉,卢明,等.特高压输电线路防舞装置的应用仿真[J].高电压技术,2016,42(12):3830-3836.(XIANG Ling,REN Yonghui,LU Ming,et al. Application simulation of anti-dancing device for UHV transmission line[J]. High voltage technology,2016,42(12):3830-3836(in Chinese)).

[12] 牟晨.超高压输电线路防舞动装置的研究与应用[J].科技与创新,2016(11):126.(MU Chen. Research and application of anti-galloping device for UHV transmission line [J]. Science and technology and innovation,2016(11):126(in Chinese)).

[13] 胡志坚,李洪江,文习山,等.基于差分GPS的输电线路舞动和风偏在线监测方法[J].电力自动化设备,2012,32(3):120-124.(HU Zhijian,LI Hongjiang,WEN Xishan,et al. Online monitoring of transmission conductor wave and wind gallop based on differential GPS[J]. Electric power automation equipment,2012,32(3):120-124(in Chinese)).

[14] 李国倡,黄新波,赵隆,等.输电导线舞动加速度传感器定位算法的研究[J].高压电器,2011,47(5):30-34.(LI Guochang,HUANG Xinbo,ZHAO Long,et al. Research on the positioning algorithm of transmission wire galloping acceleration sensor[J]. High voltage electrical apparatus,2011,47(5):30-34(in Chinese)).

（编辑　李坤璐）